

Respons pertumbuhan dan kandungan lipid *Chlorella vulgaris* terhadap variasi penambahan Mg^{2+} [Growth response and lipid content of *Chlorella vulgaris* under different nominal Mg^{2+} additions]

Miska Sanda Lembang^{1*}(iD), Tri Paus Hasiholan Hutapea²(iD), Tuty Alawiyah³(iD)

¹ Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Borneo Tarakan. Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

² Program Studi Teknologi Hasil Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Borneo Tarakan. Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

³ Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Borneo Tarakan. Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

ABSTRACT | The depletion of fossil fuels as the primary energy source has increased concerns about a global energy crisis, making renewable energy development through microalgae increasingly important. *Chlorella vulgaris* is a promising microalga due to its high biomass productivity and lipid-accumulation capacity. This study evaluated the growth and lipid responses of *Chlorella vulgaris* to nominal Mg^{2+} additions of 0, 0.4, 0.8, 1.2, and 1.6 ppm, supplied as $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, during 7 days of cultivation in sterile seawater. Cell density, dry biomass, and gravimetric crude lipid were evaluated. Each treatment consisted of one culture unit without independent replication; therefore, data were analysed descriptively. The highest cell density was observed at 1.6 ppm on day 7 ($27,923.13 \times 10^4$ cells/mL), dry biomass was highest at 0.4 ppm (1.52 g/L), and crude lipid was highest at 0.8 ppm (65.94%). At 0.8 ppm, lipid concentration and productivity were approximately 0.87 g/L and 0.124 g/L/day. The tested nominal Mg^{2+} additions were associated with distinct numerical response patterns in *Chlorella vulgaris*, with the highest cell density at 1.6 ppm, the highest dry biomass at 0.4 ppm, and the highest lipid content at 0.8 ppm.

Key words | Biomass; *Chlorella vulgaris*; crude lipid; magnesium; microalgae

ABSTRAK | Penurunan cadangan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama telah meningkatkan kekhawatiran terhadap potensi krisis energi global sehingga pengembangan energi terbarukan melalui mikroalga menjadi semakin penting. *Chlorella vulgaris* merupakan salah satu mikroalga yang potensial karena produktivitas biomassa dan kemampuannya mengakumulasi lipid. Penelitian ini mengevaluasi penambahan nominal Mg^{2+} sebesar 0; 0,4; 0,8; 1,2; dan 1,6 ppm dari $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ pada kultur *Chlorella vulgaris* dalam media air laut steril selama 7 hari. Parameter yang diamati meliputi kepadatan sel, biomassa kering, dan lipid kasar gravimetrik. Setiap perlakuan terdiri atas satu unit kultur tanpa ulangan independen sehingga data dianalisis secara deskriptif. Kepadatan sel tertinggi diamati pada perlakuan 1,6 ppm pada hari ke-7 ($27.923,13 \times 10^4$ sel/mL), biomassa kering tertinggi pada 0,4 ppm (1,52 g/L), dan lipid kasar tertinggi pada 0,8 ppm (65,94%). Pada 0,8 ppm, konsentrasi dan produktivitas lipid sekitar 0,87 g/L dan 0,124 g/L/hari. Variasi penambahan Mg^{2+} menunjukkan pola respons numerik yang berbeda pada *Chlorella vulgaris*, dengan kepadatan sel tertinggi pada 1,6 ppm, biomassa kering tertinggi pada 0,4 ppm, dan kandungan lipid tertinggi pada 0,8 ppm.

Kata kunci | Biomassa; *Chlorella vulgaris*; lipid kasar; magnesium; mikroalga

Received | 12 April 2026, Accepted | 20 Mei 2026, Published | 30 Mei 2026

***Corresponding author** Miska Sanda Lembang, Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Borneo Tarakan. Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia. **Alamat Email:** miska.lembang@borneo.ac.id

Citation Lembang, M.S., Hutapea, T.P.H., Alawiyah, T. (2026). Respons pertumbuhan dan kandungan lipid *Chlorella vulgaris* terhadap variasi konsentrasi Mg^{2+} . *Arwana: Jurnal Ilmiah Program Studi Perairan*, 8(1), 45-51.

p-ISSN (Media Cetak): 2657-0254

e-ISSN (Media Online): 2797-3530



© 2026 Oleh authors. [Arwana: Jurnal Ilmiah Program Studi Perairan](http://journal.umuslim.ac.id/index.php/jipsbp). Artikel ini bersifat open access yang didistribusikan di bawah syarat dan ketentuan [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Krisis energi global yang terjadi akibat menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya emisi karbon telah mendorong pencarian sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan efisien. Mikroalga merupakan salah satu sumber energi alternatif yang potensial karena memiliki laju pertumbuhan yang cepat, produktivitas biomassa yang tinggi, dan kemampuan mengakumulasi lipid yang dapat dikonversi menjadi biodiesel (Vargas-Estrada *et al.*, 2024). *Chlorella vulgaris* banyak diteliti untuk

produksi biomassa dan lipid. Pada kondisi kultur terkontrol, Mujtaba *et al.* (2012) melaporkan akumulasi lipid sekitar 43–53% bobot kering pada *C. vulgaris*, menunjukkan bahwa spesies ini berpotensi sebagai bahan baku biodiesel. Produksi lipid dipengaruhi oleh kondisi media kultur dan faktor lingkungan yang mengatur fotosintesis, pertumbuhan, serta alokasi karbon sel.

Pada media kultur mikroalga, magnesium (Mg^{2+}) merupakan unsur mineral esensial, bukan sumber energi. Magnesium berfungsi sebagai atom pusat molekul klorofil dan sebagai kofaktor berbagai reaksi

metabolik yang berkaitan dengan fotosintesis dan metabolisme sel. Pada *Chlorella vulgaris*, perubahan konsentrasi Mg^{2+} telah dilaporkan memengaruhi pertumbuhan, pigmen fotosintetik, serta komponen biokimia sel (Salman *et al.*, 2023). Karena itu, ketersediaan Mg^{2+} dalam media dapat berhubungan dengan pembentukan biomassa dan akumulasi lipid, tetapi responsnya bergantung pada spesies, komposisi media, dan kondisi kultivasi.

Meskipun banyak penelitian telah mengeksplorasi stres nutrisi, seperti keterbatasan nitrogen, untuk meningkatkan lipid mikroalga (Kawaroe *et al.*, 2009), posisi ilmiah pengaruh Mg^{2+} pada *Chlorella vulgaris* masih perlu dibedakan menurut kondisi kultur dan parameter yang dianalisis. Salman *et al.* (2023) menguji *C. vulgaris* air tawar pada konsentrasi Mg^{2+} 5–15 mg/L dan menilai pertumbuhan, pigmen fotosintetik, protein, karbohidrat, serta respons oksidatif; kandungan lipid tidak menjadi parameter utama studi tersebut. Hanifzadeh *et al.* (2018) menunjukkan bahwa Ca dan Mg dapat memengaruhi pembentukan biomassa, lipid, dan karbohidrat mikroalga, sedangkan Huang *et al.* (2014) melaporkan perubahan pertumbuhan, produksi lipid, dan komposisi asam lemak akibat penambahan Mg^{2+} pada *Monoraphidium sp.* Penelitian ini berbeda karena mengevaluasi secara bersamaan kepadatan sel, biomassa kering, dan lipid kasar *C. vulgaris* pada media air laut dengan penambahan nominal Mg^{2+} yang rendah, yaitu 0–1,6 ppm. Penelitian ini difokuskan pada pengaruh variasi konsentrasi ion Mg^{2+} dalam media kultur terhadap pertumbuhan, biomassa, dan akumulasi lipid *Chlorella vulgaris*, tanpa menjadikan faktor nutrisi lain sebagai perlakuan. Hipotesis penelitian adalah bahwa variasi penambahan Mg^{2+} menghasilkan pola respons yang berbeda pada kepadatan sel, biomassa kering, dan kandungan lipid *C. vulgaris*. Untuk menjawab permasalahan tersebut, *C. vulgaris* dikultur pada media dengan variasi penambahan Mg^{2+} , kemudian pertumbuhan sel, biomassa, dan lipid dievaluasi untuk mengidentifikasi nilai tertinggi dalam rentang perlakuan yang diuji. Hasil penelitian diharapkan memberikan informasi awal untuk perancangan kultur mikroalga yang menargetkan biomassa dan lipid sebagai bahan baku biodiesel.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Kultur fitoplankton *Chlorella vulgaris* diperoleh dari Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Takalar. Bahan lain yang digunakan meliputi $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, metanol, kloroform, kertas saring Whatman, air laut, larutan Walne, akuades, NaOH, NaCl, dan alkohol 70%. Perlakuan 0; 0,4; 0,8; 1,2; dan 1,6 ppm merupakan konsentrasi nominal Mg^{2+} yang ditambahkan melalui $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, bukan konsentrasi Mg^{2+} total media, karena kadar Mg^{2+} dasar air laut tidak diukur. Kode strain, status unialgal/axenic, metode identifikasi kultur, umur inokulum, kemurnian bahan kimia, dan konsentrasi Mg^{2+} awal air laut tidak tercatat dalam dokumentasi penelitian; keterbatasan ini dinyatakan untuk menghindari rekonstruksi data secara retrospektif.

Alat

Autoklaf, botol kultur kaca, lampu LED 8 W, pompa aerator, selang dan batu aerasi, refraktometer, termometer, pH meter, hemositometer, mikroskop, mikropipet, corong pemisah, timbangan analitik, dan oven.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Mei-Agustus 2025 di Laboratorium Sentral Ilmu Hayati, Universitas Borneo Tarakan.

Prosedur Penelitian

Sterilisasi peralatan dan bahan

Sterilisasi dilakukan untuk menghilangkan atau menonaktifkan mikroorganisme yang berpotensi mengontaminasi kultur. Air laut yang telah disaring disterilkan menggunakan autoklaf pada suhu 121 °C selama 20 menit (Jeheskiel *et al.*, 2022). Peralatan gelas, botol kultur kaca, selang, dan batu aerasi dicuci, dibilas, kemudian diperlakukan dengan alkohol 70% dan akuades sesuai prosedur laboratorium yang digunakan. Peralatan dikeringkan pada meja kerja yang telah dibersihkan dengan alkohol. Ukuran pori penyaringan air laut dan validasi sterilitas tidak tercatat dalam dokumentasi penelitian, sehingga tidak ditambahkan secara retrospektif.

Persiapan media dan kondisi kultivasi

Media kultur disiapkan menggunakan 750 mL air laut yang telah disaring dan disterilkan. Kondisi awal media adalah pH 7,8, suhu 27,2 °C, dan salinitas 32 ppt. Setiap unit kultur ditambahkan 0,75 mL larutan Walne (setara 1 mL/L berdasarkan volume air laut awal) dan 9 mL inokulum *Chlorella vulgaris* dengan kepadatan awal 100×10^4 sel/mL, sehingga volume kerja nominal sekitar 759,75 mL sebelum penambahan larutan Mg^{2+} . Kultur dipelihara dalam botol kaca dengan aerasi kontinu dan pencahayaan LED 8 W secara kontinu selama periode kultur. Laju aliran aerasi dan intensitas cahaya tidak diukur secara kuantitatif. Selama kultivasi, suhu tercatat 27,1–27,6 °C, pH sekitar 8,1, dan salinitas 30,3–31 ppt. Perlakuan Mg^{2+} diberikan sebagai penambahan nominal 0; 0,4; 0,8; 1,2; dan 1,6 ppm dari $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. Setiap perlakuan terdiri atas satu unit kultur tanpa ulangan biologis atau teknis independen. Kepadatan sel diamati setiap hari selama periode kultur 7 hari.

Pengukuran kepadatan sel *Chlorella vulgaris* dilakukan dengan mengambil sampel dari setiap perlakuan menggunakan pipet steril. Sampel dimasukkan ke ruang hemositometer dan diamati di bawah mikroskop. Sel dihitung pada empat kotak pengamatan dan kepadatan dinyatakan sebagai sel/mL. Tipe hemositometer, volume aktual ruang hitung, dan faktor pengenceran tidak tercatat dalam dokumentasi penelitian; oleh karena itu, persamaan di bawah mempertahankan faktor perhitungan 10^4 yang digunakan pada catatan penelitian.

$$\text{Kepadatan sel (sel/mL)} = (\text{jumlah sel yang terhitung} / 4 \text{ kotak}) \times 10^4.$$

Contoh: jika 400 sel terhitung pada empat kotak, kepadatan sel = $(400/4) \times 10^4 = 100 \times 10^4$ sel/mL.

Pengukuran biomassa *Chlorella vulgaris*

Pengukuran biomassa kering dilakukan untuk setiap perlakuan. Pada akhir periode kultur, biomassa *C. vulgaris* dipanen dengan flokulasi menggunakan NaOH 1 g/L dan didiamkan selama 24 jam untuk membentuk flok. Campuran kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman, residu dicuci dengan air suling tiga kali, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C hingga massa konstan dan ditimbang untuk memperoleh biomassa kering (Elystia *et al.*, 2019). Biomassa kering tersebut selanjutnya digunakan sebagai bahan ekstraksi lipid. Biomassa dihitung dengan persamaan berikut:

Biomassa kering (g/L) = berat biomassa kering yang diperoleh (g) /
volume kultur yang dipanen (L)

Pengukuran lipid kasar

Ekstraksi lipid dilakukan secara gravimetrik menggunakan prosedur kloroform-metanol termodifikasi. Sebanyak 0,5 g biomassa kering diekstraksi dengan kloroform:metanol (2:1, v/v), rasio yang secara prinsip berkaitan dengan metode Folch (Folch et al., 1957). Pada prosedur laboratorium yang dilakukan, metanol dan air selanjutnya ditambahkan hingga rasio fase akhir kloroform:metanol:air 1:1:0,9. Fase kloroform dipisahkan, dicuci dengan 20 mL NaCl 5%, dan dipindahkan ke cawan Petri yang telah ditimbang. Pelarut kemudian diuapkan pada 68 °C hingga diperoleh massa konstan. Karena ekstrak ditentukan secara gravimetrik tanpa karakterisasi kelas lipid atau triasilgliserol (TAG), hasil dilaporkan sebagai lipid kasar.

$$\text{Kandungan lipid kasar (\%)} = [(A - B) / C] \times 100$$

Keterangan:

A = berat cawan Petri + ekstrak lipid kasar setelah penguapan (g)

B = berat cawan Petri kosong (g)

C = berat biomassa kering sampel yang diekstraksi (g)

$$\text{Konsentrasi lipid kasar (g/L)} = \text{biomassa kering (g/L)} \times \text{kandungan lipid kasar (\%)} / 100$$

$$\text{Produktivitas lipid kasar (g/L/hari)} = \text{konsentrasi lipid kasar (g/L)} / \text{lama kultivasi (hari)}$$

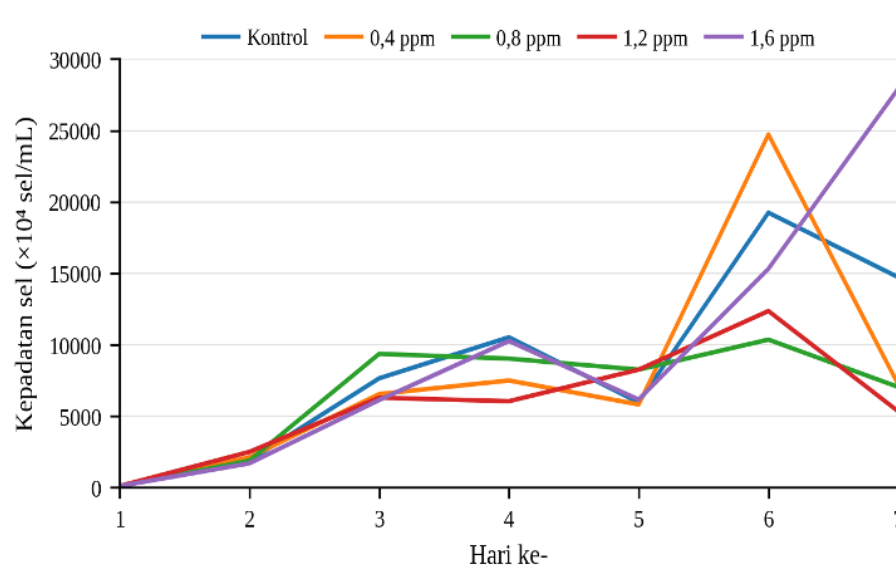
Analisis data

Analisis data dilakukan secara deskriptif karena setiap perlakuan hanya terdiri atas satu unit kultur tanpa ulangan independen. Data kepadatan sel, biomassa kering, kandungan lipid kasar, konsentrasi lipid, dan produktivitas lipid disajikan sebagai nilai pengamatan masing-masing perlakuan dan divisualisasikan menggunakan Microsoft Excel. Standar deviasi, error bar, ANOVA, uji lanjut, dan pengujian signifikansi statistik tidak dilakukan karena tidak tersedia replikasi independen. Interpretasi hasil dibatasi pada pola numerik dan nilai tertinggi atau terendah dalam rentang perlakuan yang diuji.

HASIL

Pertumbuhan *Chlorella vulgaris*

Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada berbagai konsentrasi ion magnesium (Mg^{2+}) menunjukkan pola yang bervariasi sepanjang periode kultur (Gambar 1). Pada hari ke-1 hingga ke-2, semua perlakuan memiliki kepadatan sel sekitar $100\text{--}1500 \times 10^4$ sel/mL. Pada hari ke-3 hingga ke-4, kepadatan sel meningkat pada semua perlakuan; nilai tertinggi pada rentang waktu tersebut diamati pada 0,8 ppm ($10.548,88 \times 10^4$ sel/mL) dan kontrol ($10.541,88 \times 10^4$ sel/mL), sedangkan 0,4 ppm menunjukkan $6.038,25 \times 10^4$ sel/mL. Pada hari ke-5, sebagian besar perlakuan menunjukkan penurunan kepadatan sel, sedangkan 1,6 ppm mulai meningkat. Pada hari ke-6, perlakuan 0,4 ppm mencapai $24.720,00 \times 10^4$ sel/mL sebelum menurun pada hari ke-7. Kepadatan sel tertinggi yang diamati selama penelitian terjadi pada perlakuan 1,6 ppm pada hari ke-7, yaitu $27.923,13 \times 10^4$ sel/mL. Bagian hasil ini hanya melaporkan pola numerik yang diamati dan tidak digunakan untuk menyimpulkan mekanisme fisiologis atau perbedaan statistik.

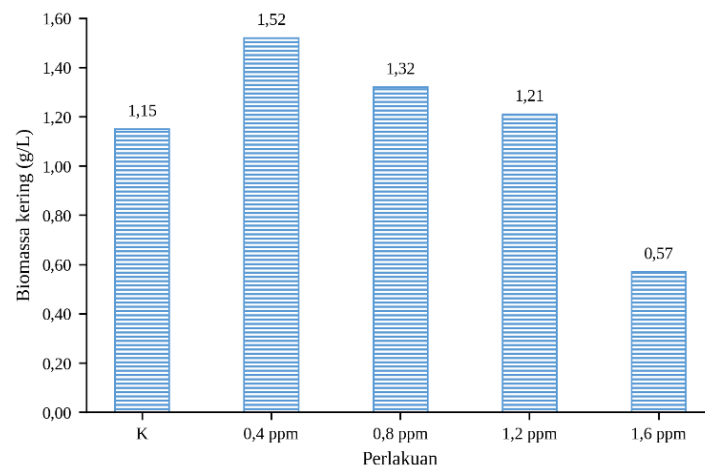


Gambar 1. Pola pertumbuhan *Chlorella vulgaris* berdasarkan kepadatan sel ($\times 10^4$ sel/mL) pada berbagai konsentrasi penambahan ion magnesium (Mg^{2+}). Nilai berasal dari satu unit kultur per perlakuan.

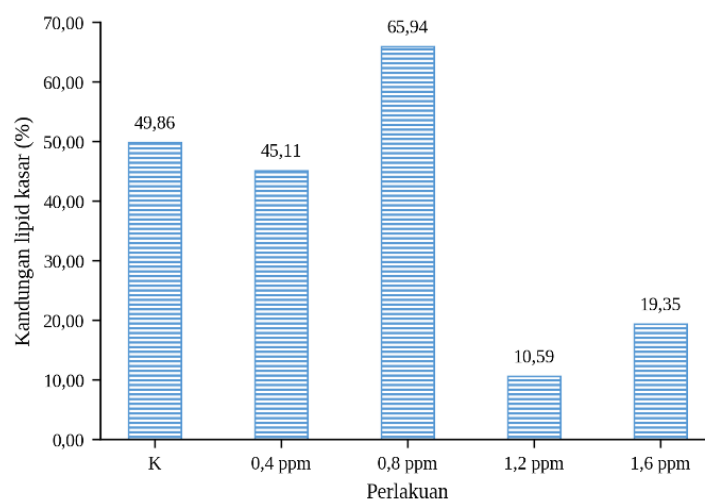
Biomassa *Chlorella vulgaris*

Pengukuran biomassa kering *Chlorella vulgaris* menunjukkan variasi numerik antara perlakuan konsentrasi ion Mg^{2+} (Gambar 2). Perlakuan kontrol (K) menghasilkan biomassa 1,15 g/L. Penambahan

0,4 ppm Mg^{2+} menghasilkan biomassa tertinggi dalam rentang yang diuji, yaitu 1,52 g/L. Biomassa pada 0,8 ppm sebesar 1,32 g/L, pada 1,2 ppm sebesar 1,21 g/L, dan pada 1,6 ppm sebesar 0,57 g/L. Nilai merupakan hasil satu unit kultur per perlakuan dan tidak diuji secara statistik.



Gambar 2. Biomassa kering *Chlorella vulgaris* pada berbagai perlakuan penambahan Mg^{2+} setelah periode kultivasi



Gambar 3. Kandungan lipid kasar gravimetrik *Chlorella vulgaris* berdasarkan bobot kering pada berbagai perlakuan penambahan Mg^{2+} .

Lipid kasar

Hasil pengukuran lipid kasar pada berbagai perlakuan penambahan Mg^{2+} menunjukkan variasi numerik antarperlakuan (Gambar 3). Kontrol menghasilkan kandungan lipid kasar 49,86%, sedangkan 0,4 ppm menghasilkan 45,11%. Kandungan lipid kasar tertinggi dalam rentang yang diuji tercatat pada 0,8 ppm sebesar 65,94%. Pada 1,2 dan 1,6 ppm, kandungan lipid kasar masing-masing sebesar 10,59% dan 19,35%. Berdasarkan biomassa kering dan fraksi lipid, konsentrasi lipid pada kontrol, 0,4, 0,8, 1,2, dan 1,6 ppm masing-masing sekitar 0,57; 0,69; 0,87; 0,13; dan 0,11 g/L. Dengan lama kultivasi 7 hari, produktivitas lipid masing-masing sekitar 0,082; 0,098; 0,124; 0,018; dan 0,016 g/L/hari. Nilai tersebut merupakan hasil deskriptif dari satu unit kultur per perlakuan dan tidak ditafsirkan sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik.

PEMBAHASAN

Pola pertumbuhan pada Gambar 1 menunjukkan bahwa respons kepadatan sel *C. vulgaris* terhadap penambahan nominal Mg^{2+} tidak mengikuti pola dosis yang sederhana selama tujuh hari kultivasi. Semua perlakuan dimulai dari kepadatan awal yang sama, kemudian memperlihatkan lintasan pertumbuhan yang berbeda. Pada 0,8 ppm dan kontrol, peningkatan kepadatan telah terlihat kuat pada hari ke-3 hingga ke-4, sedangkan pada 0,4 ppm terjadi kenaikan tajam hingga $24.720,00 \times 10^4$ sel/mL pada hari ke-6 sebelum menurun pada hari ke-7. Sebaliknya, 1,6 ppm mencapai nilai tertinggi yang diamati pada hari ke-7, yaitu $27.923,13 \times 10^4$ sel/mL. Secara biologis, pola waktu tersebut konsisten dengan sifat Mg^{2+} sebagai unsur esensial yang terlibat dalam pembentukan klorofil, transfer energi, serta berbagai reaksi enzimatik fotosintetik. Karena itu, perubahan ketersediaan Mg^{2+} dapat berasosiasi dengan perubahan kapasitas fotosintetik dan metabolisme sel, tetapi arah responsnya tidak harus meningkat

secara linear dengan konsentrasi. Salman *et al.* (2023) juga memperlihatkan bahwa pertumbuhan, klorofil-a, karotenoid, protein, karbohidrat, ROS, dan enzim antioksidan *C. vulgaris* merespons konsentrasi Mg^{2+} dan waktu kultivasi dengan pola yang berbeda-beda.

Variasi waktu munculnya puncak kepadatan sel pada Gambar 1 juga dapat dipahami sebagai respons yang bergantung pada fase kultur. Ben Amor-Ben Ayed *et al.* (2015) menunjukkan bahwa *C. vulgaris* mampu tumbuh pada rentang Mg^{2+} yang luas (8,9–465 mg/L), dengan serapan Mg^{2+} meningkat ketika konsentrasi awal Mg^{2+} meningkat. Hasil tersebut menegaskan bahwa sel *Chlorella* memiliki kapasitas adaptasi dan pengambilan Mg^{2+} yang besar, sehingga efek Mg^{2+} tidak semata-mata tercermin sebagai peningkatan atau penurunan jumlah sel secara langsung. Abo-State *et al.* (2019) juga melaporkan respons yang bergantung pada kisaran konsentrasi Mg pada *C. vulgaris*: pertumbuhan dan produktivitas biomassa maksimum diperoleh pada 75 mg/L Mg, sedangkan konsentrasi yang lebih rendah maupun lebih tinggi menghasilkan respons pertumbuhan yang lebih rendah. Walaupun konsentrasi dan media pada penelitian tersebut berbeda dengan penelitian ini, kedua studi tersebut mendukung interpretasi bahwa pola kepadatan sel pada Gambar 1 merupakan respons konsentrasi-spesifik dan fase-spesifik, bukan hubungan linier sederhana antara penambahan Mg^{2+} dan pertumbuhan.

Pada Gambar 2, biomassa kering tertinggi yang diamati terdapat pada 0,4 ppm, yaitu 1,52 g/L, atau sekitar 32,2% lebih tinggi secara numerik dibandingkan kontrol sebesar 1,15 g/L. Biomassa kemudian tercatat 1,32 g/L pada 0,8 ppm, 1,21 g/L pada 1,2 ppm, dan 0,57 g/L pada 1,6 ppm. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan penambahan nominal Mg^{2+} tidak diikuti peningkatan biomassa secara bertahap. Secara fisiologis, Mg^{2+} memiliki fungsi yang langsung terkait dengan pembentukan biomassa karena menjadi atom pusat klorofil dan kofaktor bagi reaksi yang menggunakan ATP serta sejumlah enzim metabolisme karbon. Namun, peningkatan ketersediaan Mg^{2+} tidak selalu diterjemahkan menjadi akumulasi biomassa yang lebih besar karena karbon hasil fotosintesis dapat dialokasikan ke berbagai komponen sel. Hanifzadeh *et al.* (2018) menunjukkan bahwa manipulasi Ca dan Mg dapat mengubah pembentukan biomassa, lipid, dan karbohidrat mikroalga, sedangkan Abo-State *et al.* (2019) menemukan bahwa konsentrasi Mg yang memberikan biomassa tertinggi pada *C. vulgaris* tidak sama dengan konsentrasi yang menghasilkan fraksi lipid tertinggi. Dengan demikian, nilai biomassa 1,52 g/L pada 0,4 ppm dalam penelitian ini lebih tepat dibaca sebagai titik respons biomassa tertinggi dalam rentang perlakuan yang diuji, bukan sebagai bukti bahwa semakin tinggi Mg^{2+} akan semakin meningkatkan pembentukan biomassa.

Perbandingan Gambar 1 dan Gambar 2 memberikan informasi penting karena kepadatan sel dan biomassa kering tidak menunjukkan urutan respons yang sama. Pada 1,6 ppm, kepadatan sel hari ke-7 merupakan nilai tertinggi yang diamati, tetapi biomassa kering akhirnya hanya 0,57 g/L, terendah di antara perlakuan. Sebaliknya, 0,4 ppm menghasilkan biomassa tertinggi walaupun kepadatan sel hari ke-7 bukan yang tertinggi. Secara konseptual, perbedaan tersebut dapat dipahami karena kepadatan sel menggambarkan jumlah sel per satuan volume, sedangkan biomassa kering merepresentasikan total materi sel yang merupakan hasil gabungan jumlah sel, ukuran sel, serta kandungan makromolekul seperti protein, karbohidrat dan lipid. Literatur mengenai *C. vulgaris*

menunjukkan bahwa komposisi sel dapat berubah nyata mengikuti kondisi kultivasi, sehingga perubahan jumlah sel tidak selalu paralel dengan perubahan massa kering. Kovalova *et al.* (2026) juga menunjukkan bahwa suplementasi $MgSO_4$ dapat memodulasi pigmen fotosintetik, akumulasi lipid, komposisi asam lemak, dan sifat permukaan sel *C. vulgaris* secara bergantung kondisi cahaya. Oleh karena itu, ketidaksamaan pola antara Gambar 1 dan Gambar 2 dapat dipahami sebagai indikasi adanya perbedaan respons antara proliferasi sel dan akumulasi materi sel, meskipun penelitian ini tidak mengukur ukuran maupun komposisi setiap sel secara langsung.

Hasil paling menonjol pada Gambar 3 adalah kandungan lipid kasar sebesar 65,94% pada 0,8 ppm, dibandingkan 49,86% pada kontrol dan 45,11% pada 0,4 ppm. Secara numerik, nilai pada 0,8 ppm lebih tinggi 16,08 poin persentase dibandingkan kontrol. Pola ini berbeda dari biomassa, karena biomassa tertinggi terdapat pada 0,4 ppm. Pemisahan antara puncak biomassa dan puncak fraksi lipid memiliki dasar biologis yang kuat pada mikroalga. Sintesis lipid merupakan bagian dari pengaturan aliran karbon sel; ketika kebutuhan karbon untuk pembelahan dan pembentukan struktur sel berubah, sebagian karbon dapat diarahkan ke penyimpanan energi dalam bentuk lipid. Mg^{2+} relevan pada proses tersebut karena selain menopang fotosintesis dan pembentukan ATP, ion ini juga berperan sebagai kofaktor pada reaksi enzimatik yang terkait dengan metabolisme asam lemak. Chen dan Wang (2021) menjelaskan bahwa akumulasi lipid mikroalga ditentukan oleh koordinasi antara penyediaan prekursor asetil-CoA, energi dan daya reduksi, serta regulasi enzim biosintesis asam lemak. Song *et al.* (2024) selanjutnya menekankan bahwa biosintesis asam lemak pada mikroalga merupakan proses terintegrasi yang sangat dipengaruhi status metabolik dan kondisi kultur.

Hasil pada 0,8 ppm dapat dibandingkan langsung dengan studi sebelumnya pada *C. vulgaris*. Abo-State *et al.* (2019) melaporkan bahwa biomassa dan lipid tidak mencapai nilai maksimum pada konsentrasi Mg yang sama: pertumbuhan spesifik dan produktivitas biomassa tertinggi diperoleh pada 75 mg/L Mg, sedangkan kandungan lipid sel tertinggi, 20,77%, diperoleh pada 150 mg/L. Dengan kata lain, peningkatan fraksi lipid dapat terjadi pada kondisi yang bukan merupakan kondisi dengan biomassa maksimum. Pola tersebut sejalan secara konseptual dengan penelitian ini, yaitu biomassa tertinggi pada 0,4 ppm tetapi kandungan lipid kasar tertinggi pada 0,8 ppm. Huang *et al.* (2014) pada *Monoraphidium sp. FXY-10* juga menunjukkan bahwa suplementasi Mg^{2+} dapat mengubah pertumbuhan, produksi lipid, dan komposisi asam lemak, sedangkan Hanifzadeh *et al.* (2018) menunjukkan bahwa pengaturan Mg dan Ca dapat meningkatkan pembentukan produk karbon tanpa pola yang identik dengan biomassa. Kesamaan pola lintas studi ini memperkuat penjelasan bahwa respons biomassa dan akumulasi lipid terhadap mineral tidak harus berjalan searah, walaupun besarnya konsentrasi efektif tetap sangat bergantung pada galur, komposisi medium, cahaya, salinitas, dan fase kultur.

Penurunan kandungan lipid kasar pada 1,2 ppm menjadi 10,59% dan peningkatan kembali pada 1,6 ppm menjadi 19,35% semakin menegaskan adanya pola nonlinier. Pola tersebut tidak konsisten dengan asumsi bahwa semakin banyak Mg^{2+} yang ditambahkan akan semakin besar akumulasi lipid. Salman *et al.* (2023) menunjukkan bahwa peningkatan Mg^{2+} pada *C. vulgaris* diikuti perubahan yang tidak seragam pada pigmen fotosintetik, ROS, SOD, CAT, protein, dan

karbohidrat, sehingga respons terhadap Mg^{2+} melibatkan penyesuaian metabolik yang luas, bukan hanya satu jalur biosintesis. Kovalova *et al.* (2026) juga melaporkan bahwa efek $MgSO_4$ terhadap pigmentasi dan metabolisme lipid sangat dipengaruhi kondisi cahaya. Pada penelitian yang menerapkan $MgSO_4$ setelah fase stasioner, Dodangodage *et al.* (2026) menemukan peningkatan biomassa dan fraksi lipid *C. vulgaris* setelah pemberian $MgSO_4$, yang kembali menunjukkan pentingnya fase fisiologis saat Mg diberikan. Karena penelitian ini menggunakan media air laut, konteks ionik juga relevan. Rautenberger *et al.* (2024) membuktikan bahwa *C. vulgaris* dapat mempertahankan produksi biomassa dan lipid dalam media yang mengandung 50% air laut, tetapi performanya berubah menurut mode kultivasi. Dengan demikian, pola 0,8–1,6 ppm pada Gambar 3 lebih dapat dipandang sebagai respons metabolik yang bergantung kondisi kultur daripada sebagai respons dosis tunggal yang monoton.

Ketika kandungan lipid digabungkan dengan biomassa, interpretasi hasil menjadi lebih relevan untuk tujuan produksi. Perlakuan 0,8 ppm menghasilkan konsentrasi lipid kasar sekitar 0,87 g/L dan produktivitas sekitar 0,124 g/L/hari, dibandingkan sekitar 0,57 g/L dan 0,082 g/L/hari pada kontrol. Pada 0,4 ppm, meskipun biomassa kering tertinggi, kandungan lipid yang lebih rendah menghasilkan konsentrasi lipid sekitar 0,69 g/L dan produktivitas sekitar 0,098 g/L/hari. Artinya, dalam data penelitian ini, nilai lipid tertinggi pada 0,8 ppm tidak hanya muncul sebagai persentase terhadap bobot kering, tetapi juga tetap menjadi nilai tertinggi setelah memperhitungkan biomassa dan lama kultivasi. Hal ini penting karena kandungan lipid yang tinggi belum tentu menghasilkan produktivitas lipid yang tinggi apabila biomassa sangat rendah. Morales *et al.* (2021) menekankan bahwa evaluasi mikroalga sebagai bahan baku lipid perlu mempertimbangkan secara bersama kandungan lipid, produksi biomassa, produktivitas lipid, dan akhirnya profil asam lemak. Rautenberger *et al.* (2024) juga menunjukkan bahwa *C. vulgaris* dapat menghasilkan fraksi lipid tinggi dalam media yang mengandung air laut, tetapi performa lipid sangat terkait dengan strategi kultivasi. Oleh karena itu, hasil 0,8 ppm pada penelitian ini mempunyai arti terutama sebagai kondisi dengan keluaran lipid numerik tertinggi di dalam sistem kultur dan periode pengamatan yang digunakan, bukan sebagai konsentrasi optimum universal.

Jika Gambar 1–3 dibaca secara terpadu, hasil utama penelitian ini adalah adanya pemisahan nilai maksimum antarparameter: kepadatan sel akhir tertinggi pada 1,6 ppm, biomassa kering tertinggi pada 0,4 ppm, sedangkan kandungan, konsentrasi, dan produktivitas lipid kasar tertinggi pada 0,8 ppm. Secara ilmiah, pemisahan tersebut menunjukkan bahwa respons *C. vulgaris* terhadap penambahan nominal Mg^{2+} dalam kondisi penelitian ini tidak dapat direduksi menjadi satu indikator pertumbuhan saja. Jumlah sel, akumulasi massa kering, dan penyimpanan lipid mewakili tingkat organisasi biologis yang berbeda dan dapat merespons lingkungan kultur secara tidak identik. Pola serupa, yakni kondisi yang menguntungkan biomassa tidak selalu identik dengan kondisi yang meningkatkan fraksi lipid, telah dilaporkan pada *C. vulgaris* dan mikroalga lain (Abo-State *et al.*, 2019; Hanifzadeh *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2025). Karena data penelitian ini bersifat deskriptif, interpretasi yang paling tepat adalah bahwa rentang penambahan Mg^{2+} yang diuji menghasilkan konfigurasi respons yang berbeda pada masing-masing parameter, dengan 0,4 ppm menonjol pada biomassa dan 0,8 ppm menonjol pada keluaran lipid.

KESIMPULAN

Variasi penambahan Mg^{2+} menunjukkan pola respons numerik yang berbeda pada pertumbuhan, biomassa, dan kandungan lipid kasar *Chlorella vulgaris* dalam rentang perlakuan yang diuji. Kepadatan sel tertinggi sebesar $27.923,13 \times 10^4$ sel/mL diamati pada penambahan 1,6 ppm Mg^{2+} pada hari ke-7. Biomassa kering tertinggi diperoleh pada 0,4 ppm sebesar 1,52 g/L, sedangkan kandungan lipid kasar tertinggi diperoleh pada 0,8 ppm sebesar 65,94%. Pada 0,8 ppm, konsentrasi dan produktivitas lipid terhitung sekitar 0,87 g/L dan 0,124 g/L/hari.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Takalar atas penyediaan kultur *Chlorella vulgaris*. Kami juga berterima kasih kepada Universitas Borneo Tarakan atas dukungan pendanaan melalui DIPA UBT 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Abo-State, M. A. M., Shanab, S. M. M., & Ali, H. E. A. (2019). Effect of nutrients and gamma radiation on growth and lipid accumulation of *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 12(1), 332–342. doi: 10.1080/16878507.2019.1662216
- Ben Amor-Ben Ayed, H., Taïdi, B., Ayadi, H., Pareau, D., & Stambouli, M. (2015). Effect of magnesium ion concentration in autotrophic cultures of *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, 9, 291–296. doi: 10.1016/j.algal.2015.03.021
- Chen, H., & Wang, Q. (2021). Regulatory mechanisms of lipid biosynthesis in microalgae. *Biological Reviews*, 96(5), 2373–2391. doi: 10.1111/brv.12759
- Dodangodage, C. A., Kasturiarachchi, J. C., Perera, T. A., Rajapakshe, S. D., Niyangoda, S. S., & Halwatura, R. U. (2026). Biochemical shifts in *Chlorella vulgaris* via post-stationary magnesium sulfate stress: Optimizing biomass for advanced bio-fertilizers. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1867866. doi: 10.3389/fpls.2026.1867866
- Elystia, S., Muria, S. R., & Pertiwi, S. I. P. (2019). Pemanfaatan mikroalga *Chlorella sp.* untuk produksi lipid dalam media limbah cair hotel dengan variasi rasio C:N dan panjang gelombang cahaya. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 11(1). doi: 10.20885/jstl.vol11.iss1.art3
- Folch, J., Lees, M., & Sloane Stanley, G. H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *Journal of Biological Chemistry*, 226(1), 497–509. doi: 10.1016/S0021-9258(18)64849-5
- Hanifzadeh, M., Garcia, E. C., & Viamajala, S. (2018). Production of lipid and carbohydrate from microalgae without compromising biomass productivities: Role of Ca and Mg. *Renewable Energy*, 127, 989–997. doi: 10.1016/j.renene.2018.05.012
- Huang, L., Xu, J., Li, T., Wang, L., Deng, T., & Yu, X. (2014). Effects of additional Mg^{2+} on the growth, lipid production, and fatty acid composition of *Monoraphidium sp.* FXY-10 under different culture conditions. *Annals of Microbiology*, 64(3), 1247–1256. doi: 10.1007/s13213-013-0768-9
- Jeheskiel, A. V., Kemer, K., Mantiri, D. M. H., Paulus, J., Rompas, R. M., & Khreekhoff, R. (2022). Effect of lead acetate on the growth of marine microalgae *Chlorella vulgaris*. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 10(2), 364. doi: 10.35800/jip.v10i2.42458
- Kawaroe, M., Prartono, T., Sunuddin, A., Sari, D. W., & Augustine, D. (2009). Laju pertumbuhan spesifik *Chlorella sp.* dan *Dunaliella sp.* berdasarkan perbedaan nutrisi dan fotoperiode. *Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*, 16(1), 73–77.
- Kovalova, S., Golub, N., Levturn, I., & Koltysheva, D. (2026). Differential physiological acclimation and lipid remodeling induced by $MgSO_4$ and $CaCl_2$ supplementation in *Chlorella vulgaris* under contrasting light regimes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 282, 113523. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2026.113523
- Liu, Y., Liu, X., Zhang, L., Xiao, P., Qiu, F., Cheng, Z., Li, W., & Zhao, Y. (2025). A review of strategies enhancing lipid production from *Chlorella*: Progress and comparative analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 74, 104190. doi: 10.1016/j.seta.2025.104190
- Morales, M., Afalo, C., & Bernard, O. (2021). Microalgal lipids: A review of lipids potential and quantification for 95 phytoplankton species. *Biomass and Bioenergy*, 150, 106108. doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106108
- Mujtaba, G., Choi, W., Lee, C.-G., & Lee, K. (2012). Lipid production by *Chlorella vulgaris* after a shift from nutrient-rich to nitrogen starvation conditions. *Bioresour. Technology*, 123, 279–283. doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.057
- Rautenberger, R., Détaïn, A., Skjånes, K., Schulze, P. S. C., Kiron, V., & Morales-Sánchez, D. (2024). Growth strategies of *Chlorella vulgaris* in seawater for a high production of biomass and lipids suitable for biodiesel. *Algal Research*, 77, 103360. doi: 10.1016/j.algal.2023.103360

- Salman, J. M., Grmasha, R. A., Stenger-Kovács, C., Lengyel, E., Al-sareji, O. J., AL-Cheban, A. M. A. A., & Meiczinger, M. (2023). Influence of magnesium concentrations on the biomass and biochemical variations in the freshwater algae, *Chlorella vulgaris*. *Heliyon*, 9(1), e13072. doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e13072](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13072)
- Song, Y., Wang, F., Chen, L., & Zhang, W. (2024). Engineering fatty acid biosynthesis in microalgae: Recent progress and perspectives. *Marine Drugs*, 22(5), 216. doi: [10.3390/md22050216](https://doi.org/10.3390/md22050216)
- Vargas-Estrada, L., Domínguez-Espíndola, R. B., & Sebastian, P. J. (2024). The influence of Fe₂O₃ nanoparticles on *Chlorella spp.* growth and biochemicals accumulation. *Waste and Biomass Valorization*, 15(6), 3281–3295. doi: [10.1007/s12649-023-02378-z](https://doi.org/10.1007/s12649-023-02378-z)